

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЧУГУНА

Рассматривается процесс кристаллизации чугуна под влиянием импульсного магнитного поля с точки зрения статистических закономерностей. Теоретически предсказана зависимость уменьшения размеров кристаллитов от характера внешнего магнитного воздействия. Получено выражение для определения количества атомов в области ближнего порядка. Приведены результаты экспериментального исследования влияния ИМП на процесс кристаллизации чугуна.

Ключевые слова: расплав, кристаллизация, микроструктура, статистика Максвелла-Больцмана, магнитное поле, импульс, ближний порядок, зародыш кристалла.

M. B. Arkulis, N. I. Misheneva, A. A. Nefed'yev, Yu. I. Savchenko

EFFECT OF PULSED MAGNETIC FIELD ON THE PROCESS OF CRYSTALLIZATION OF GREY IRON

The article deals with the process of crystallization of the iron under the impact of a pulsed magnetic field in terms of statistical regularities. It has been theoretically predicted dependence of reducing the size of the crystallites from the nature of the external magnetic impact. It has received the expression for determining the number of atoms in the field of short-range order. The results are shown of experimental studies of the effect of pulsed magnetic field on the process of crystallization of grey iron.

Keywords: melt, crystallization, microstructure, Maxwell-Boltzmann statistics, the magnetic field, pulse, short-range order, the grain of crystals.

Введение

Механические свойства металлов в основном определяются их микроструктурой. Чем более микронеоднороден металл (т. е. меньше размер зерна), тем выше эксплуатационные и технологические, свойства металлов. Размеры микронеоднородностей металла зависят от природы самого металла и условий его кристаллизации.

В настоящее время известно множество способов обработки металлов, целью которых является повышение микронеоднородности: ультразвуковая обработка, электромагнитное перемешивание [1], способы порошковой металлургии и т. д. Особый интерес вызывает обработка расплавов импульсным магнитным полем. Методы обработки, а также результаты исследований представлены в ряде работ [7–11]. В частности проводились исследования импульсно-магнитной обработки расплавов алюминиевых сплавов, полимеров, прессованной древесины и стекла.

Результатом всех работ является однозначные выводы о том, что при обработке расплава материала импульсным магнитным полем, происходят благоприятные изменения в структуре материала и, как следствие, улучшаются механические свойства в твердом состоянии.

В данной работе представлены теоретические положения механизма влияния импульсного магнитного поля на процесс кристаллизации и первичные результаты экспериментальной проверки выдвинутой гипотезы. В качестве экспериментального материала взят серый чугун.

Теоретические положения

Жидкие металлы и сплавы микронеоднородны по структуре и составу, они отличаются высокотермической устойчивостью, наследственной от твердого состояния структурой ближнего порядка [5]. В расплаве чугуна можно выделить три составляющих: кластеры с составом аустенита, являющиеся основой жидкого чугуна; кластеры графита объемом в несколько единиц нм^3 и соединения карбида железа Fe_3C , которое присутствует в форме межатомных возникающих и непрерывно разрывающихся мерцающих связей между кластерами углерода и аустенита. Таким образом, расплав следует рассматривать, как жидкость с микронеоднородными образованиями, чувствительными к внешнему воздействию.

Чугун в жидком парамагнитном состоянии является классической системой, к которой применима статистика Максвелла–Больцмана [2]. Теоретически получена формула отношения числа зародышей кристаллов N в

расплаве при наличии внешнего импульсного магнитного поля к числу зародышей кристаллов N_0 в отсутствие внешнего воздействия. Частота следования импульсов магнитного поля приблизительно 1 Гц.

$$\frac{N}{N_0} = \exp \left\{ \frac{-\Delta W_m}{kT} \right\}, \quad (1)$$

где « $-\Delta W_m$ » – добавочная энергия магнитного дипольного момента \vec{p}_m в магнитном поле с индукцией \vec{B} ; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура системы.

Добавочная энергия одного атома определяется выражением

$$-\Delta W_m = p_{mz} B, \quad (2)$$

где p_{mz} – проекция магнитного момента атома железа на направление вектора индукции \vec{B} .

Величина « $-\Delta W_m$ » положительна, так как железо при температуре плавления является парамагнитным [2], и магнитный дипольный момент одного атома железа равен

$$p_{mz} = n \cdot \mu_B, \quad (3)$$

где $n = 2,218$ – число магнетонов Бора, приходящихся на один атом железа [3]. Опуская промежуточные вычисления и переходя к напряженности H , получим выражение для добавочной энергии одного атома

$$-\Delta W_m = Z \cdot p_{mz} \mu_0 \cdot H = Z \cdot 2,06 \cdot 10^{-23} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot H \approx Z \cdot 2,6 \cdot 10^{-29} H. \quad (4)$$

где $Z = \frac{\tau_{kp}}{\tau_1}$ – число импульсов магнитного поля, воспринимаемое расплавом за время кристаллизации τ_{kp} ; τ_1 – длительность одного импульса.

Подставив (4) в (1), получим

$$\frac{N}{N_0} = \exp \left\{ \frac{Z \cdot 2,6 \cdot 10^{-29} H}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1,5 \cdot 10^3} \right\} \cong \exp \left\{ Z \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} H \right\}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что $\frac{N}{N_0} > 1$; $N > N_0$.

Поскольку $N \cdot d^3 = \text{const}$ (где d – линейные размеры кристалла), то увеличение числа зародышей, с учетом (8), приводит к уменьшению размеров кристаллитов d в соотношении

$$\frac{d_0}{d} = \sqrt[3]{\frac{N}{N_0}} = \exp\left\{\frac{Z \cdot 1,25 \cdot 10^{-9} H}{3}\right\} = e^{Z \cdot 0,417 \cdot 10^{-9} H} \quad (9)$$

Если учесть, что жидкий расплав есть система областей ближнего порядка [6], содержащих ν атомов, то

$$\frac{d_0}{d} = e^{\nu \cdot Z \cdot 0,417 \cdot 10^{-9} H} \quad (10)$$

Приведем графики зависимостей расчетов по (10) для $Z = 130$ и различных ν (рис. 1).

Анализ полученных зависимостей показывает, что импульсное магнитное поле, при определенных условиях, в частности при $\nu > 10$, оказывает существенное влияние на уменьшение размеров кристаллитов.

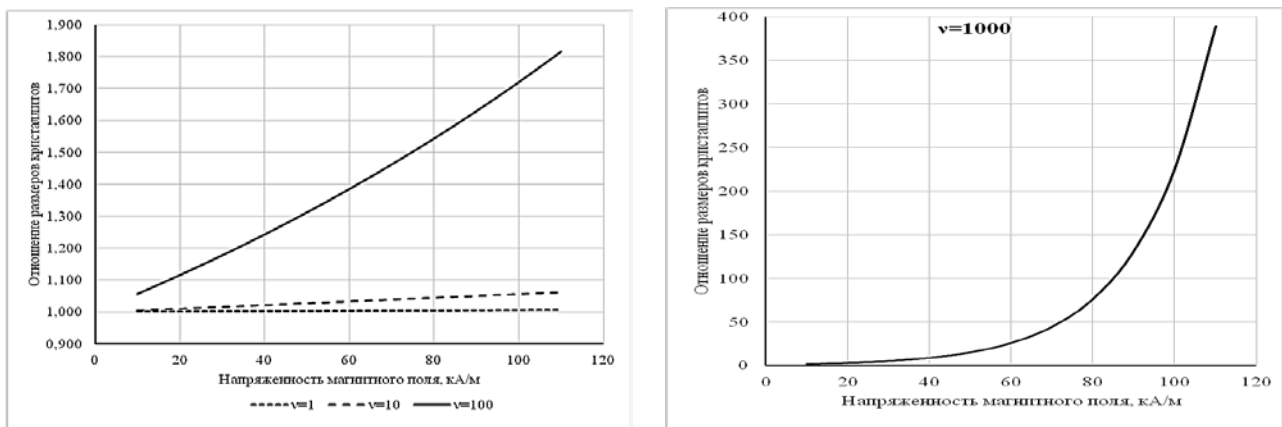


Рис. 1. Относительное уменьшение размеров кристаллитов с ростом величины напряженности магнитного поля

Также следует отметить, что экспериментальное определение величины $\frac{d_0}{d}$, позволяет определить количество атомов в области ближнего порядка:

$$\nu = \frac{1}{Z \cdot H \cdot 0,417 \cdot 10^{-9}} \ln \frac{d_0}{d} \quad (11)$$

Используя полученные зависимости (10) и (11), можно подобрать режим импульсной магнитной обработки, для получения необходимой микроструктуры.

Экспериментальная проверка теоретических положений

Нами проведены эксперименты по обработке расплава серого чугуна импульсным магнитным полем.

Одновременно с обрабатываемым ИМП образцом отливался образец без обработки.

Для сравнения механических характеристик, полученных образцов, проведены замеры значений коэрцитивной силы H_C образцов диаметром $D = 25$ мм.

Данные измерения показали незначительное увеличение коэрцитивной силы (5–10 %) образца подвергшегося обработке ИМП по сравнению с образцом без обработки. Предполагаем, что это связано с малым временем кристаллизации и с малой частотой следования импульсов.

Фотографии микрошлифов (с увеличением 10^3) образцов диаметрами 25мм, представлены на рис. 2.

Структура чугуна ферритная с включениями пластинчатого графита.

Воздействие ИМП привело к некоторому уменьшению графитовых включений по сравнению с образцами, не подвергавшимися воздействию ИМП.

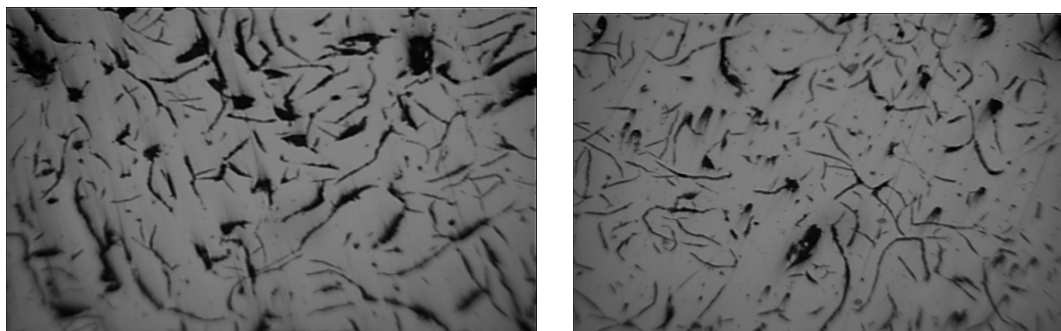


Рис. 2. Образец $D = 25$ мм (край): а – без поля, б – с полем

Выводы

1. В работе получены результаты подтверждающие увеличение микронеоднородности металла при обработке расплава ИМП.

2. В дальнейших исследованиях необходимо подобрать режим обработки ИМП для получения заданной неоднородности металла.

3. Определить отношение размера кристаллитов d в образце обработанном ИМП к размерам кристаллитов d_0 в образце, отлитом без обработки, с целью определения числа атомов ближнего порядка v в расплаве, что позволит аналитически предсказывать необходимую микроструктуру металла.

Список литературы

1. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов / И. М. Ячиков [и др.]. – МГТУ, 2014. – 192 с.
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика: Учеб. для физ спец. вузов. – 2-е изд, перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 360 с.
3. Иродов И. Е. Электромагнетизм. Основные законы. – 3-е изд., испр. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 352 с.
4. Бозорт Р. Ферромагнетизм : пер. с англ. – М., 1956.
5. Ершов Г. С., Поздняк А. П. Микронеоднородность металлов и сплавов. – Металлургия, 1985. – 214с.
6. Френкель Я. И. – Изд-во «Наука», Ленингр. отд., 1975. – 592 с.
7. Черников Д. Г. Разработка физического способа модифицирования литейных алюминиевых сплавов магнитно-импульсной обработкой // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Вып. № 2-3/274(560). – 2009. – С. 87–92.
8. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т / В. А. Глушечков [и др.] // Литейное производство. – 2011. – № 9. – С. 8–11.
9. Левин М. Н., Постников В. В., Матвеев Н. Н. Влияние импульсной магнитной обработки на кристаллизацию гибкоцепных полимеров // Высокомолек. соед. А. – 2003. – Т.45, №2. – С. 217–223.
10. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на модифицированную древесину/ В. В. Постников [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, вып. 9. – С. 14–19.
11. Алексеенко В. И. Возможности влияния импульсного магнитного поля на структурные состояния в оксидном стекле // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68, № 10. – С. 50–54.